

**MODELADO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE TRANSDUCTORES DE  
ULTRASONIDO PARA ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

**ELMER MORALES LÓPEZ**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SANTIAGO DE CALI  
2012**

**MODELADO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE TRANSDUCTORES DE  
ULTRASONIDO PARA ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

**ELMER MORALES LÓPEZ**

**Proyecto de grado para optar al título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director  
EDIGUER ENRIQUE FRANCO GUZMÁN  
Doctor en Ciencias**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SANTIAGO DE CALI  
2012**

**Nota de aceptación:**

**Aprobado por el comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de ingeniero mecánico.**

**Ing. JHON JAIRO CABRERA**  
**Jurado**

---

**Ing. FARUK FONTAL**  
**Jurado**

---

**Santiago de Cali, 12 diciembre de 2012**

## **CONTENIDO**

<b>RESUMEN</b>	<b>11</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>12</b>
<b>1 OBJETIVOS</b>	<b>13</b>
<b>1.1 OBJETIVO GENERAL</b>	<b>13</b>
<b>1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS</b>	<b>13</b>
<b>2 ANTECEDENTES</b>	<b>14</b>
<b>3 MARCO TEÓRICO</b>	<b>15</b>
<b>3.1 PROPAGACIÓN UNIDIMENSIONAL DE ONDAS ACÚSTICAS</b>	<b>15</b>
3.1.1 Velocidad de propagación	16
3.1.2 Impedancia acústica	17
<b>3.2 MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS</b>	<b>17</b>
<b>3.3 TRANSDUCTORES DE ULTRASONIDO</b>	<b>19</b>
3.3.1 Ancho de banda del transductor	21
3.3.2 Frecuencia de resonancia y antiresonancia eléctrica	23
<b>3.4 MODELADO DE TRANSDUCTORES DE ULTRASONIDO POR EL MÉTODO DE LA MATRIZ DISTRIBUIDA</b>	<b>24</b>
3.4.1 Matriz del elemento activo	26
3.4.2 Matriz del elemento pasivo	26
3.4.3 Impedancia eléctrica del transductor	27
3.4.4 Funciones de transferencia de emisión y emisión recepción	27
3.4.5 Perdidas	27

<b>3.5 DETECCIÓN DE FALLAS POR ULTRASONIDO</b>	<b>28</b>
<b>4 MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>29</b>
<b>4.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ENCAPSULADO</b>	<b>29</b>
<b>4.2 MONTAJE EXPERIMENTAL</b>	<b>32</b>
<b>5 RESULTADOS</b>	<b>34</b>
<b>5.1 SIMULACIÓN DEL TRANSDUCTOR</b>	<b>34</b>
<b>5.2 MODO TRANSMISIÓN-RECEPCIÓN</b>	<b>36</b>
<b>5.3 MODO PULSO ECO</b>	<b>39</b>
<b>6 CONCLUSIONES</b>	<b>40</b>
<b>6.1 RECOMENDACIONES</b>	<b>41</b>
<b>7 BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>42</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1. Ondas de cuerpo en sólidos (adaptado de <a href="http://geophysics.eas.gatech.edu">http://geophysics.eas.gatech.edu</a>).</b>	<b>15</b>
<b>Figura 2. Esquema de un transductor de ultrasonido basado en una cerámica piezoeléctrica (adaptado de Franco, 2006 [4]).</b>	<b>19</b>
<b>Figura 3. Comparación de las (a) formas de onda y (b) el ancho de dos transductores ultrasónicos, uno amortiguado y uno resonante.</b>	<b>22</b>
<b>Figura 4. Circuito eléctrico equivalente de una cerámica piezoeléctrica.</b>	<b>23</b>
<b>Figura 5. Módulo de impedancia eléctrica en función de la frecuencia para un material piezoeléctrico en el vacío.</b>	<b>24</b>
<b>Figura 6. Representación esquemática del transductor.</b>	<b>25</b>
<b>Figura 7. Modelo de tres puertos de un transductor piezoeléctrico.</b>	<b>25</b>
<b>Figura 8. Detección de defectos en piezas mecánicas por ultrasonido (imagen adaptada de NDT Education Resource Center [9]).</b>	<b>28</b>
<b>Figura 9. Pasos del proceso de fabricación del transductor.</b>	<b>30</b>
<b>Figura 10. Apariencia final del par de transductores ultrasónicos de 500 kHz.</b>	<b>32</b>
<b>Figura 11. (Montaje experimental: (a) transmisión–recepción y (b) pulso–eco.</b>	<b>33</b>
<b>Figura 12. Simulación de la respuesta del transductor usando el método de la matriz distribuida: (a) función de transferencia de emisión (FTE) y (b) módulo de la impedancia eléctrica (<math>Z_E</math>).</b>	<b>35</b>
<b>Figura 13. Simulación de la respuesta del transductor usando el método de la matriz distribuida: (a) función de transferencia de emisión–recepción y (b) respuesta temporal.</b>	<b>36</b>
<b>Figura 14. Señal ultrasónica en modo emisión–recepción vista en el osciloscopio.</b>	<b>36</b>
<b>Figura 15. (a) forma de onda y (b) espectro de Fourier del pulso ultrasónico obtenido experimentalmente en modo emisión–recepción.</b>	<b>37</b>
<b>Figura 16. Tren de pulsos obtenidos con el transdcutor de ultrasonido en</b>	



## **LISTA DE TABLAS**

<b>Tabla 1. Propiedades acústicas de algunos materiales comunes [7].</b>	<b>16</b>
<b>Tabla 2. Propiedades físicas del PZT 5A.</b>	<b>29</b>
<b>Tabla 3. Propiedades físicas de los materiales usados en la capa de adaptación.</b>	<b>29</b>



## ABREVIATURAS

<b>PZT:</b>	Zirconato Titanio de Plomo.
<b>END:</b>	Ensayos No Destructivos.
<b>FTE:</b>	Función de Transferencia de Emisión.
<b>FTER:</b>	Altura del dominio rectangular inicial.
<b>BNC:</b>	Ballonet Neill-Concelman, tipo de conector para uso con cable coaxial, terminal de conexión de los transductores mostrados en el siguiente trabajo.
<b>USM 25:</b>	Equipo Krautkramer serie 25 usado para inspecciones ultrasónicas.

## GLOSARIO

**Modulo de Poisson:** constante elástica la cual muestra una medida del estrechamiento de una sección de algún material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento.

**Modulo de Young:** relación entre el esfuerzo normal y la deformación adimensional en determinado material. El modulo de Young también llamado modulo de elasticidad longitudinal caracteriza el comportamiento de un material elástico.

**Modulo transversal o de cizallamiento:** relación entre el esfuerzo cortante y la deformación adimensional por cortante en determinado material. El modulo de cizalladura es una constante elástica la cual identifica el cambio de forma que experimenta un material elástico cuando se aplican esfuerzos cortantes.

**Coefficiente de acoplamiento electromecánico:** indica la eficiencia para vibrar y transformar la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa, característica de la cerámica piezoeléctrica.

**Función de transferencia de Emisión (FTE):** se define como la razón entre la fuerza ejercida por una carga dada y la tensión eléctrica aplicada por un generador de voltaje.

**Función de transferencia de Emisión – Recepción (FTER):** se define como la razón entre la tensión eléctrica aplicada por un generador y la tensión eléctrica obtenida en la recepción.

**Impedancia:** resistencia aparente de un circuito eléctrico al paso de la corriente alterna. La impedancia establece la relación entre el voltaje y la intensidad de corriente. La impedancia acústica es análoga a la impedancia eléctrica y la unidades de impedancia acústica son los “rayl” ( $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ ).

**Ancho de banda:** es la medida de la longitud en hercios (Hz), del rango de frecuencias en el que se concentra la mayor parte de la potencia de determinada señal.

**Resonancia:** sonido que se ocasiona por la repercusión que produce otro sonido, es la prolongación de un sonido que por grados se va atenuando.

**Reactancia:** resistencia que opone al paso de una corriente alterna un condensador o una bobina.

**Inductor:** un inductor o bobina es un componente pasivo de un circuito eléctrico el cual debido al fenómeno de la autoinducción, almacena energía en forma de campo magnético.

## RESUMEN

Los materiales piezoeléctricos son la primera opción para la construcción de transductores de ultrasonido. El fenómeno piezoeléctrico fue descubierto en 1880 por Jaques y Pierre Curie, cuando observaron que al aplicar presión a un cristal de cuarzo se generaba una carga eléctrica. Pasaron varias décadas antes de que los materiales piezoeléctricos tuvieran aplicaciones prácticas. La primera aplicación fue militar, durante la primera guerra mundial, en detectores ultrasónicos para submarinos (sonar). Posteriormente, en la década de 1940, las mismas técnicas aplicadas en el sonar fueron aplicadas a menor escala para generar las primeras imágenes médicas. Luego, en la década de 1950, científicos japoneses descubrieron los cerámicos piezoeléctricos, siendo el primero de ellos el titanato de bario.

Como el efecto piezoeléctrico que exhiben los materiales naturales como el cuarzo, la turmalina, la sal de rochelle, entre otros, es muy pequeño, se han desarrollado materiales con propiedades mejoradas, como lo son los materiales cerámicos ferro eléctricos policristalinos, como el BaTiO<sub>3</sub> y el Zirconato Titanio de Plomo (PZT) que es actualmente el material piezoeléctrico más ampliamente usado.

Este trabajo trata sobre el diseño y construcción de un par de transductores de ultrasonido para ensayos no destructivos (END) y caracterización de Materiales. El material piezoeléctrico es del tipo PZT-5A con frecuencia de operación de 0,5 MHz.

El trabajo inicia mostrando la teoría y conceptos básicos relacionados con la acústica, como son las bases teóricas de la propagación de ondas y se definen conceptos importantes como la impedancia acústica, atenuación, frecuencia, etc., y características especiales de los transductores ultrasónicos, como son su estructura interna y el ancho de banda, entre otros. Además, un modelo matemático matricial usado para el modelado unidimensional del transductor es estudiado e implementado en matlab. Este modelo permite simular su comportamiento y ayuda a diseñar sus partes internas, especialmente las capas de adaptación o matching y la capa de retaguardia o backing.

Posteriormente, se muestra cómo se desarrolló la fabricación del transductor, las características de los materiales usados y se muestra el comportamiento teórico basado en la simulación en el software Matlab. Finalmente se analiza el comportamiento real con ambos transductores en modo transmisión y pulso eco, datos requeridos para su caracterización y muy útiles para su posterior uso en ensayos no destructivos.

Palabras claves: Transductores, propagación, materiales piezoeléctricos, ultrasonido.

## INTRODUCCIÓN

Acerca del tema de ultrasonido se empieza a hablar en la primera guerra mundial debido a la necesidad de detectar los submarinos. Los primeros experimentos fueron realizados por el físico francés Paul Langevin quien en 1916 logró detectar la presencia de un submarino a una distancia de varios centenares de metros usando cristales de cuarzo como transductores. Más tarde, en la década de 1940, se realizaron estudios sobre el uso del ultrasonido con fines médicos, principalmente en la detección de tumores y enfermedades del corazón, y posteriormente se creó el primer scanner para visualizar imágenes en 2D del interior del cuerpo humano [2]. Las aplicaciones están presentes en muchas áreas de la ingeniería y ciencia en general, desde las imágenes médicas, la detección de fallas en piezas y estructuras, hasta aplicaciones en la microelectrónica y en el ámbito militar [7].

Los transductores de ultrasonido son el principal elemento de toda aplicación ultrasónica. Específicamente en el área de ensayos no destructivo, es la parte que entra en contacto directo con el material, genera y detecta las ondas acústicas que permiten estudiar sus propiedades físicas o las fallas pueda tener [9].

El ultrasonido como tema de investigación es nuevo en Colombia. Por lo general se estudian las técnicas de detección de fallas con equipos comerciales y la investigación sobre el desarrollo de nuevas técnicas ultrasónicas y la construcción de equipos ha sido poco abordada. Esto se refleja claramente en el hecho de que se siguen importando todos los equipos o elementos necesarios para realizar las tareas de mantenimiento preventivo.

En este trabajo se fabricó, modeló y caracterizó un par de transductores de ultrasonido para ensayos no destructivos usando cerámicas piezoeléctricas tipo PZT (Zirconato titanato de plomo). Además, debido a la falta de material en español sobre el tema, el informe final servirá de gran utilidad para trabajos futuros en este campo.

En la actualidad empresas nacionales requieren el servicio de ultrasonido en sus plantas, para determinar espesores en piezas, caracterizar materiales o detectar la presencia de defectos en cualquier elemento. En la universidad Autónoma se cuenta con un equipo que puede ser de gran ayuda para entrenar a los alumnos acerca del tema y dar a conocer una herramienta valiosa en el medio laboral a los estudiantes de ingeniería de cualquier disciplina.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Modelar, construir y caracterizar un par de transductores de ultrasonido de 0,5 MHz para ensayos no destructivos usando cerámicas piezoeléctricas tipo PZT.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar un modelo del transductor usando el método de la matriz distribuida.
- Investigar las opciones de materiales disponibles localmente y usar el modelo desarrollado para simular el funcionamiento del transductor ultrasónico, con base en las simulaciones realizadas, definir los parámetros de diseño del transductor.
- Construir los transductores de ultrasonido. Con base en las exigencias planteadas y empleando los materiales seleccionados.
- Caracterizar los transductores contruidos (forma de onda, ancho de banda y relación señal-ruido) y compararlos con transductores comerciales.

## 2. ANTECEDENTES

Existe inicialmente una motivación económica para la elaboración de transductores de ultrasonido. Estos transductores se basan en cerámicas piezoeléctricas que cuestan entre 5 y 15 dólares la unidad y un transductor comercial cuesta cientos de dólares. Teniendo en cuenta que el material piezoeléctrico es la parte central del transductor y que solamente se adicionan algunas capas extras de materiales pasivos, generalmente resinas poliméricas, y un encapsulado impermeable, el valor agregado del producto es muy alto. Además, empresas como las petroleras usan una gran cantidad de estos dispositivos para el mantenimiento de sus oleoductos, plataformas, tanques, etc. y la fabricación local puede reducir considerablemente los costos. Por otro lado, transductores de ultrasonido son usados para muchas otras aplicaciones, la más familiar, y al mismo tiempo avanzada, es la ecografía o imágenes médicas por ultrasonido.

El ultrasonido y los materiales piezoeléctricos son usados en muchas industrias, como la de semiconductores para memorias y filtros de señales, la industria militar para sonares, en la industria automotriz para sensores, etc. Este trabajo puede ser un primer acercamiento a un área de la ingeniería que es estratégica hoy en día para cualquier país y que tiene mucho por ser investigado y desarrollado.

Es de tener en cuenta también que la literatura en español sobre el tema es muy escasa y el trabajo a continuación puede ser un material de consulta importante para las personas interesadas en el tema. Por otro lado, es bien sabido que los países con mayor influencia a nivel global son aquellos que producen productos tecnológicos de alto valor agregado. Nuestro país necesita fabricar productos de alto valor agregado que le aporten a la economía y para este fin el desarrollo tecnológico es condición necesaria, por ellos la fabricación de un par de transductores de ultrasonido para ensayos no destructivos. Estos dispositivos pueden servir de herramienta para el aprendizaje y la detección de fallas en piezas mecánicas en el laboratorio de mecánica de sólidos de la UAO.

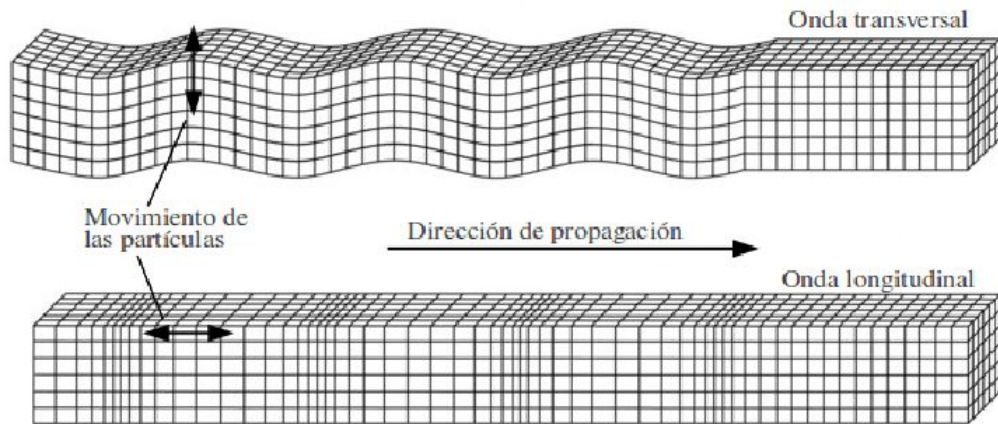
El avance en transductores basados en piezoeléctricos ha sido fundamental en el mejoramiento de las técnicas de ensayos no destructivos, para la determinación de propiedades mecánicas de materiales de manera económica y segura. En Colombia no existen proveedores oficiales que permitan la adquisición de transductores piezoeléctricos estandarizados a precios accesibles para las industrias o para su investigación. Este trabajo quiere que el diseño y a la construcción de transductores piezoeléctricos con materiales disponibles en el mercado y de bajo costo permitan aplicaciones industriales que impulsen investigaciones cada vez mejores para fomentar el estudio del sonido como fenómeno importante para diversas aplicaciones de ingeniería y establecer un área de aplicación para los ingenieros en el medio, la cual sirva como herramienta de desarrollo y oportunidades de generación de empresa y negocio.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 PROPAGACIÓN UNIDIMENSIONAL DE ONDAS ACÚSTICAS

En el cuerpo de un material sólido solamente se puede propagar dos tipos de ondas acústicas: longitudinales y transversales. Las ondas longitudinales, también llamadas de presión, son una perturbación en la tensión mecánica que se propaga en el material y donde el movimiento vibratorio de una partícula ocurre en la misma dirección de propagación. En el caso de las ondas transversales, el movimiento vibratorio de una partícula ocurre en la dirección perpendicular al de propagación. Una representación esquemática de estos dos tipos de ondas se muestra en la figura 1. Estas ondas tienen relación directa con las tensiones normal y transversal y su velocidad de propagación depende de las constantes elásticas del material [7].

**Figura 1: Ondas de cuerpo en sólidos (adaptado de <http://geophysics.eas.gatech.edu>).**



Para el caso de un material isotrópico y homogéneo, la propagación unidimensional de una onda acústica de cuerpo es modelada por

$$\frac{d^2u}{dx^2} = \frac{1}{c^2} \frac{d^2u}{dt^2} \quad (1)$$

donde  $u$  es el desplazamiento de una partícula,  $t$  es el tiempo,  $x$  es la dirección de propagación y  $c$  la velocidad de propagación de la onda. La solución de esta ecuación diferencial de segunda orden es una función oscilatoria en términos de las variables independientes  $x$  y  $t$ :

$$u(x,t) = x_0 e^{j(\omega t \pm kx)}, \quad (2)$$

donde  $x_0$  es la amplitud de la onda,  $k = 2\pi/\lambda$  es el número de onda,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $j = \sqrt{-1}$  es el operador imaginario y los signos  $+$  y  $-$  representan una onda propagándose para la izquierda y para la derecha, respectivamente. La ecuación anterior puede expresarse en términos de senos y cosenos aplicando la identidad de Euler [2].

La velocidad de propagación de las ondas está relacionada con las propiedades elásticas del material. Para deducir la ecuación (1) se supone una relación tensión-deformación lineal (ley de Hooke), esto permite obtener las siguientes ecuaciones para las velocidades de propagación longitudinal ( $c_p$ ) y transversal o de cizallamiento ( $c_s$ ):

$$c_p = \sqrt{\frac{G(4G - E)}{\rho(3G - E)}} = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (3)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 - \nu)}} \quad (4)$$

Donde  $E$  es el módulo de Young,  $G$  es el módulo transversal o de cizallamiento,  $\nu$  es el módulo de Poisson y  $\rho$  es la densidad. Se debe recordar que las propiedades elásticas de un material isotrópico son modeladas completamente por dos constantes elásticas, entonces los pares de constantes ( $G$ ,  $E$ ) y ( $E$ ,  $\nu$ ) son maneras diferentes de representar las propiedades elásticas del mismo material. Como, en general, el módulo transversal de un material es menor que el módulo de Young, las ondas longitudinales se propagan a mayor velocidad que las transversales. En la tabla 1 se muestran las propiedades acústicas de algunos de los materiales más usados en ultrasonido.

**Tabla 1. Propiedades acústicas de algunos materiales comunes [7].**

Material	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (m/s)	$c_s$ (m/s)	$Z_p$ (Mrayl)	$Z_s$ (Mrayl)
Acero	7900	5900	3200	46,0	24,9
Aluminio	2700	6420	3040	17,33	8,21
Vidrio	2260	5640	3280	13,1	7,62
Agua	1000	1480	-	1,48	-
Aire	1,24	344	-	0,00043	-

**3.1.1 Velocidad de propagación.** La velocidad de propagación, comúnmente representada en la literatura como  $c$ , depende de la capacidad que el cuerpo posee de cambiarla relación masa/volumen es decir la densidad en el momento de la perturbación. Si en un medio continuo, la compresión y expansión producto de una excitación ocurre a una muy alta velocidad, el desplazamiento de las partículas va a ser menor que si las compresión y descompresión es lenta este comportamiento es normalmente el observado en gases, adicionalmente, la amplitud desplazamiento brinda la posibilidad de que se produzca perdidas por irreversibilidades por fricción. La longitud de onda  $\lambda$ ; variable que diferencia a las ondas de las partículas (matemáticamente la partícula siempre está bien localizada mientras que la onda está distribuida en todo infinito; una onda tipo seno por ejemplo, está dada en función de la velocidad de propagación y la frecuencia de excitación.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (5)$$



De la ecuación anterior se puede deducir que en  $\lambda$  están contenidas las propiedades mecánicas de ese medio de propagación, este concepto resulta útil para la aplicación de diversas técnicas que permiten la identificación de tales propiedades a través de la comparación de las longitudes de onda de un frente de ondas viajando a través de un medio desconocido con algún modelo matemático que incluya tales parámetros. Es importante tener en cuenta que el módulo de elasticidad  $E$  y la densidad  $\rho$ , los cuales determinan a la velocidad de propagación son entidades que puede variar con las propiedades termodinámicas como la presión, la temperatura (energía interna), el volumen y la entropía.

**3.1.2 Impedancia acústica.** La impedancia acústica ( $Z$ ) está definida como la razón entre la tensión y la velocidad de la partícula y es la propiedad acústica más importante. La impedancia acústica representa la facilidad que posee un material para transmitir la vibración acústica. Para una onda plana propagándose para el frente (en el sentido positivo de las  $x$ ) en un medio perfectamente elástico, la impedancia acústica está dada por:

$$z = \rho c. \quad (6)$$

El concepto de impedancia acústica es análogo al concepto de impedancia eléctrica de la teoría electromagnética. Las unidades de la impedancia acústica en el sistema internacional son  $N.s/m^3$ , esta unidad es llamada “rayl”.

## 3.2 MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

Tal y como se ha venido mencionando la parte más importante del transductor de ultrasonido es el material piezoeléctrico, se le llama material activo dado que es el único que tiene interacción eléctrica, la cerámica piezoeléctrica por si sola constituye el transductor sin embargo los demás elementos son necesarios para proteger dicha cerámica y además mejorar las capacidades acústicas que esta tiene mejorando así su funcionamiento y las señales que se pueden obtener. El material piezoeléctrico se deforma sobre la acción de un campo eléctrico y genera un campo eléctrico al ser deformado, entonces en un material piezoeléctrico la tensión depende de la deformación y también del campo eléctrico; el desplazamiento eléctrico depende del campo eléctrico y de la deformación. Las ecuaciones que constituyen el efecto piezoeléctrico son [6]:

$$T_i = c_{ij}^E S_j - e_{mi} E_m \quad (7)$$

$$D_m = e_{im} S_i - \epsilon_{mn}^S E_n \quad (8)$$

para  $i, j = 1, 2, 3, \dots, 6$  y  $m, n = 1, 2, 3$ , donde:

- $S_j$  – Vector de deformación
- $T_i$  – Vector de esfuerzo mecánico
- $c_{ij}$  – Matriz de constantes elásticas
- $e_{im}$  – Matriz de coeficientes piezoeléctricos
- $\epsilon_{mn}$  – Matriz de constantes de permisividad eléctrica
- $D_m$  – Vector de desplazamiento eléctrico
- $E_m$  – Vector de campo eléctrico

Los superíndices  $E$  y  $S$  significan que las propiedades del material son medidas a campo eléctrico constante y deformación constante, respectivamente. Existen formas alternativas para estas variables dependiendo cuales variables sean escogidas como independientes y cuales como dependientes. En estas ecuaciones, los subíndices  $i$  y  $j$  representan las diferentes componentes de la tensión mecánica que se pueden presentar en el caso tridimensional, usando la notación simplificada:

$$T_1 = T_{xx}, T_2 = T_{yy}, T_3 = T_{zz}, T_4 = T_{xy}, T_5 = T_{yz} \text{ y } T_6 = T_{xz},$$

cada una de estas componentes de tensión mecánica tiene una componente de deformación relacionada [12]. Los subíndices  $m$  y  $n$  representan las dimensiones espaciales, es decir,  $1 = x$ ,  $2 = y$  y  $3 = z$ .

Las ecuaciones 7 y 8 deben ser particularizadas para un determinado material piezoeléctrico. La literatura proporciona el tipo de simetría de cada material, lo que define las matrices de propiedades, y los valores de los coeficientes de cada una de las matrices. Estos valores generalmente son proporcionados por los fabricantes de materiales piezoeléctricos o son obtenidos en laboratorio con ensayos especialmente diseñados. Por ejemplo, una cerámica PZT-5A polarizada en la dirección 3 (eje  $z$ ) tiene simetría  $6mm$  y las ecuaciones expandidas quedan de la siguiente manera [1]:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{12}^E & c_{11}^E & c_{11}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{13}^E & c_{13}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{13}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{13}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{11}^E - c_{12}^E}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{31}^E \\ 0 & 0 & e_{31}^E \\ 0 & 0 & e_{33}^E \\ 0 & e_{15}^E & 0 \\ e_{15}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15}^E & 0 & 0 \\ e_{31}^E & e_{31}^E & e_{33}^E & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

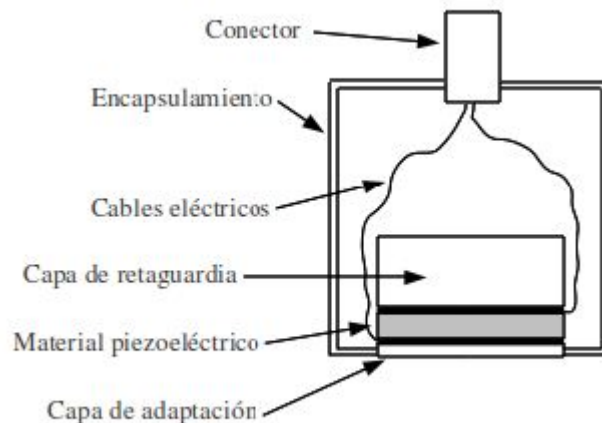
La solución de las ecuaciones anteriores es un proceso complicado, pero existen varios métodos propuestos por diferentes autores. En estos métodos, las ecuaciones anteriores

son simplificadas suponiendo que el campo eléctrico es aplicado a la cerámica en una única dirección (como realmente ocurre en la práctica). Además, escogiendo adecuadamente la geometría, se pueden suponer con buena aproximación una o más tensiones iguales a cero. Esto simplifica considerablemente el problema, reduciéndose, inclusive, a un problema unidimensional [4].

### 3.3 TRANSDUCTORES DE ULTRASONIDO

El transductor es el dispositivo encargado de generar y recibir las ondas acústicas. Su parte más importante es el material piezoeléctrico, siendo que los demás componentes sirven para proporcionar el encapsulamiento requerido para las condiciones de trabajo y la mejora de las propiedades del transductor. La figura 2 muestra la partes internas de un transductor típico de ultrasonido [2].

**Figura 2: Esquema de un transductor de ultrasonido basado en una cerámica piezoeléctrica (adaptado de Franco, 2006 [4]).**



Las partes mostradas en la figura son descritas a continuación:

- **Material piezoeléctrico** — Es la parte principal del transductor porque es el elemento encargado de convertir energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. Se le llama elemento activo porque es el único que tiene interacción eléctrica. El elemento piezoeléctrico por si solo sirve como transductor, sin embargo, los elementos restantes sirven para mejorar su funcionamiento y le proporcionan un encapsulado robusto adecuado para el trabajo en diferentes condiciones.
- **Capa de adaptación** — Es una capa de material, generalmente polimérico, que sirve para aumentar la cantidad transmitida al material testado.

- **Capa de retaguardia** — Es una capa de material compuesto (polvo de algún metal o alúmina en una matriz polimérica) que sirve para amortiguar la vibración del elemento piezoeléctrico, aumentando su ancho de banda.

- **Encapsulamiento** — El transductor necesita ser encapsulado para proteger sus elementos constitutivos. Como muchos ensayos son realizados en inmersión, el encapsulado debe ser completamente hermético. Generalmente es usado acero inoxidable para este fin.

- **Cables eléctricos** — El elemento piezoeléctrico funciona como un condensador de placas paralelas. Las dos caras del elemento son metalizadas para generar un campo eléctrico. Los cables conducen la energía eléctrica desde el conector hasta el elemento.

- **Conector** — Permite la conexión y desconexión rápida del transductor de los equipos eléctricos encargados de excitar el transductor (pulsador) y recibir las señales eléctricas de los ecos (pulsador/receptor). Generalmente se usan conectores BNC.

La capa de retaguardia (denominada también *backing*), tiene como función absorber las vibraciones mecánicas producidas por la cerámica piezoeléctrica las cuales se propagan hacia atrás del transductor, así evitando reflexiones indeseadas. El material de la capa de retaguardia debe tener una impedancia acústica cercana a la impedancia de la cerámica, para minimizar la reflexión, esta capa debe cumplir la función de absorber la onda que se propaga por el material de la capa de retaguardia, minimizando la amplitud de las ondas reflejadas en la superficie posterior de esta capa.

La capa de adaptación (denominada también *matching layer*), tiene dos funciones, la primera es proteger el material piezoeléctrico y la segunda es hacer el acoplamiento de la impedancia acústica entre la cerámica y el medio. Se debe buscar la máxima transmisión posible de energía del material piezoeléctrico, para que dicha transmisión total entre la cerámica y el medio sea máxima la impedancia acústica de la capa de retaguardia acústica está dada por [7]:

$$Z_m = \sqrt{Z_1 Z_2}, \quad (11)$$

donde  $Z_m$ ,  $Z_1$  y  $Z_2$  son las impedancias acústicas de la capa de adaptación, la cerámica piezoeléctrica y el medio donde se desea propagar las ondas, respectivamente. Por otro lado, la teoría establece que el existe un espesor ideal de la capa de adaptación para obtener la máxima transferencia de energía [7]:

$$e_m = \frac{\lambda_m}{4}, \quad (12)$$

donde  $\lambda_m$  es la longitud de onda del material de la capa de adaptación. Queda claro que este espesor depende de la frecuencia de trabajo del transductor.

El encapsulamiento se hace para proteger los elementos constitutivos del transductor.

Como muchos ensayos son realizados en inmersión, el encapsulado debe ser completamente hermético. Generalmente es usado acero inoxidable para este fin.

Los cables eléctricos van en el elemento piezoeléctrico, el cual funciona como un condensador de placas paralelas. Las dos caras del elemento son metalizadas para generar un campo eléctrico. Los cables conducen la energía eléctrica desde el conector hasta el elemento.

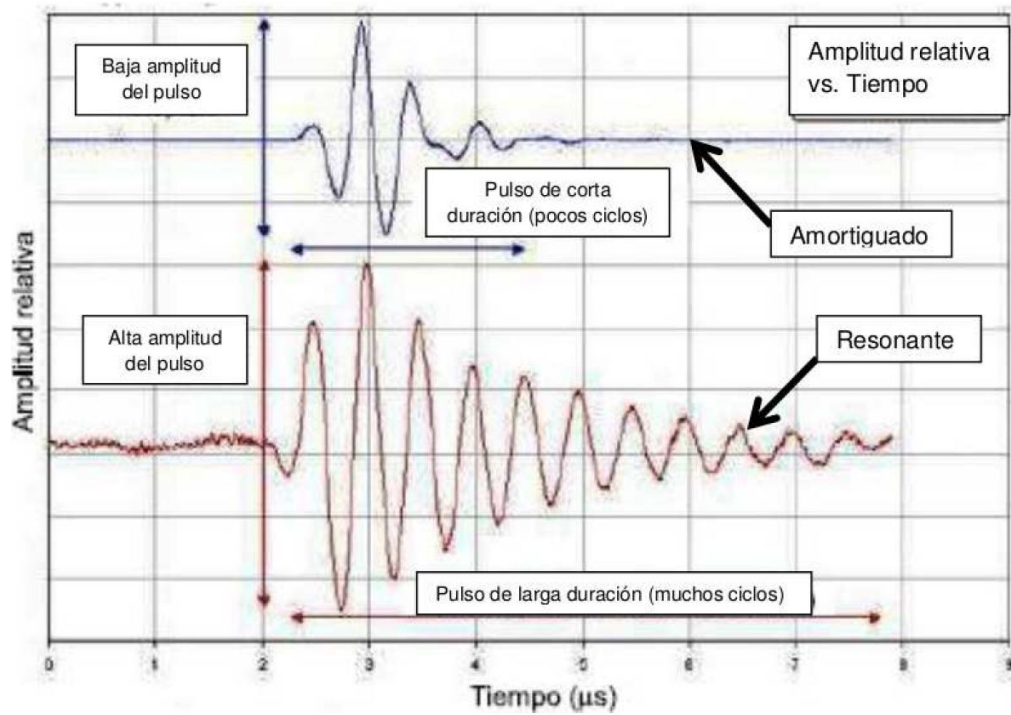
El conector permite la conexión y desconexión rápida del transductor de los equipos eléctricos encargados de excitar el transductor (pulsador) y recibir las señales eléctricas de los ecos (pulsador/receptor). Generalmente se usan conectores BNC (Bayonet Neill-Concelman).

**3.3.1 Ancho de banda del transductor.** La propiedad más importante de todo transductor de ultrasonido es su ancho de banda. Se define como la longitud, medida en Hz, del rango de frecuencias en el que se concentra la mayor parte de la potencia de la señal [10]. La figura 3 muestra la comparación de las formas de onda y el ancho de dos transductores ultrasónicos, uno amortiguado y uno resonante.

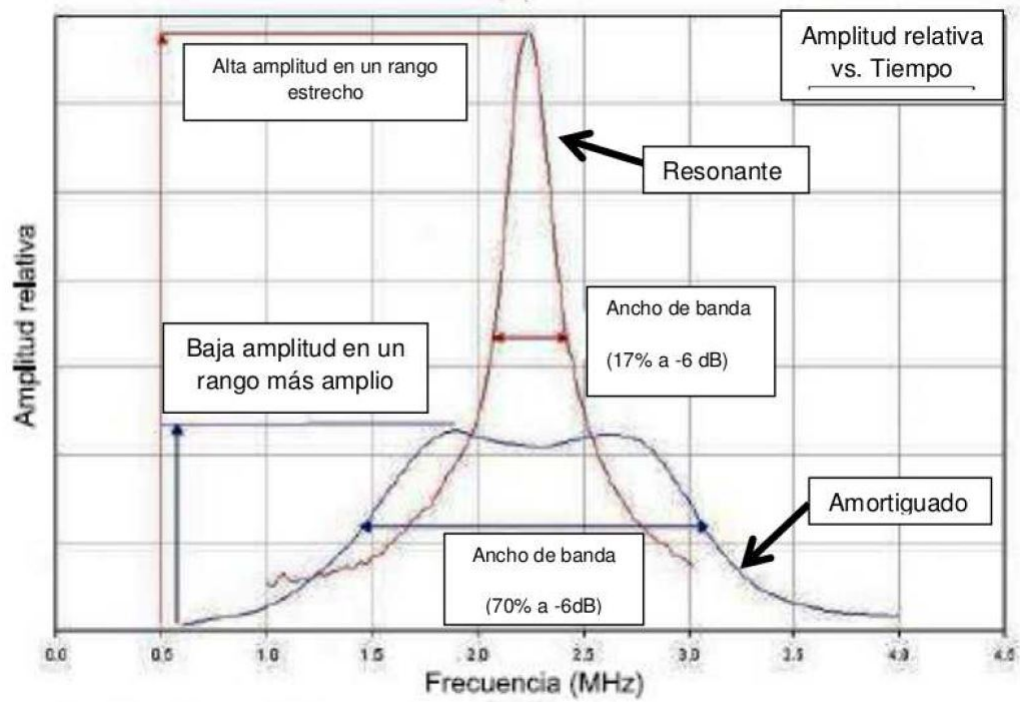
El transductor amortiguado, o de banda ancha, posee pocos ciclos y de menor amplitud en su respuesta temporal, pero su espectro de frecuencia está repartido en un rango más amplio. Esto permite generar y recibir las ondas en un rango más amplio de frecuencias. Además, la menor cantidad de ciclos en su respuesta temporal permite una mayor resolución porque se reduce la sobreposición de los ecos, permitiendo la detección de defectos menores y en piezas de menor tamaño. Los transductores usados para la detección de defectos en piezas son, generalmente, de banda ancha [3].

El transductor resonante o de banda estrecha, posee una mayor cantidad de ciclos y de mayor amplitud en su respuesta temporal, esto significa que su espectro de frecuencias está concentrado en un rango pequeño. Estos transductores presentan menor resolución temporal y solamente pueden trabajar en un rango menor de frecuencias, sin embargo, generan ondas de mayor potencia y son especialmente útiles en la caracterización de materiales [3].

Figura 3: Comparación de las (a) formas de onda y (b) el ancho de dos transductores ultrasónicos, uno amortiguado y uno resonante.



(a)

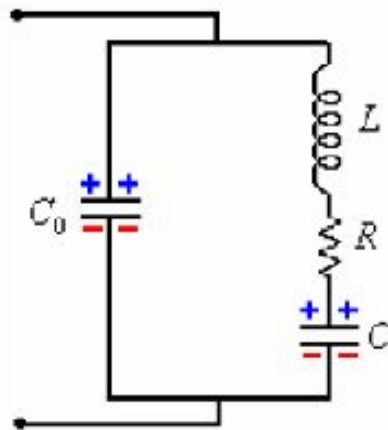


(b)

El ancho de banda se determina, como se muestra en la figura 3a, calculando el ancho del rango de frecuencias donde las amplitudes son mayores a -6 dB, esto es aproximadamente la mitad de la amplitud máxima. El ancho de banda se acostumbra expresar en un porcentaje de la frecuencia central del transductor.

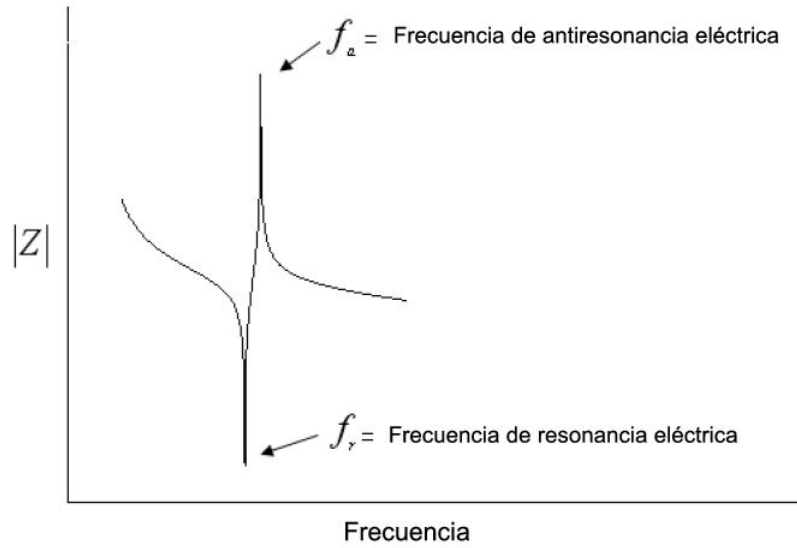
**3.3.2 Frecuencia de resonancia y antiresonancia eléctrica.** Para explicar más a fondo como trabajan los materiales piezoeléctricos se plantea a continuación el circuito eléctrico equivalente con una dirección de vibración paralela de la excitación eléctrica y vibra cerca de sus frecuencias de resonancia.

**Figura 4: Circuito eléctrico equivalente de una cerámica piezoeléctrica.**



En el anterior circuito el capacitor  $C_0$  representa la parte mecánica, el inductor de inductancia  $L$  corresponde a la masa,  $R$  a la resistencia, el capacitor  $C$  al amortiguamiento. En este circuito ocurre una interacción de resonancia mecánica y resonancia eléctrica debido al efecto piezoeléctrico. A la frecuencia de resonancia eléctrica ( $f_r$ ) las reactancias  $X_L$  y  $X_C$  en el inductor y el capacitor se anulan por ser opuestas en signo e iguales en magnitud, presentándose una carga eléctrica puramente resistiva. La resonancia es el punto de la curva del módulo de impedancia eléctrica donde se presenta la mínima impedancia. La figura 4 muestra el circuito equivalente de una cerámica piezoeléctrica vibrando en el vacío. La figura 5 muestra la curva característica del módulo de impedancia eléctrica en función de la frecuencia para un material piezoeléctrico en el vacío.

**Figura 5: Módulo de impedancia eléctrica en función de la frecuencia para un material piezoeléctrico en el vacío.**



Cuando se tienen frecuencias mayores que la frecuencia de resonancia eléctrica, la parte mecánica se vuelve inductiva debido a que la resistencia  $X_C$  tiende a cero. A la frecuencia de antiresonancia ( $f_a$ ), la impedancia eléctrica tienden al valor máximo, pues en el circuito en serie se vuelve igual y opuesta a la impedancia de  $C_0$  y a que la corriente opuesta fluye por los dos circuitos. Entre más ajustadas estén las frecuencias de resonancia y antiresonancia mayor será el coeficiente de acoplamiento electromecánico  $K_a$ , el cual indica la eficiencia para vibrar y transformación de la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa.

### **3.4 MODELADO DE TRANSDUCTORES DE ULTRASONIDO POR EL MÉTODO DE LA MATRIZ DISTRIBUIDA**

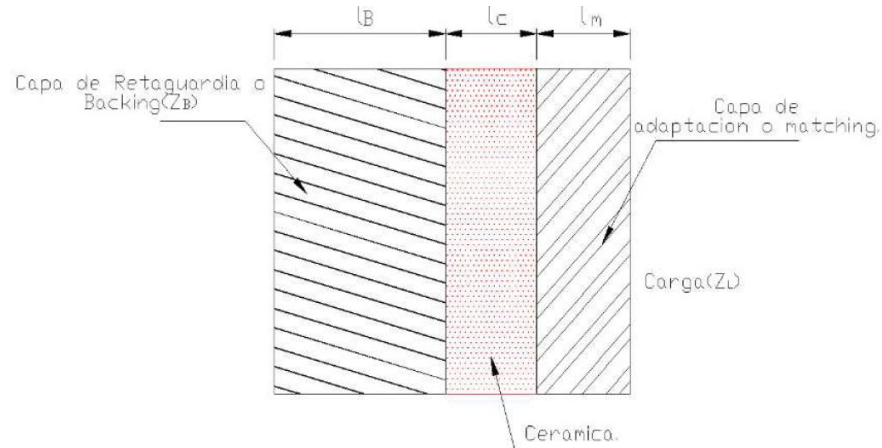
El modelado de un transductor de ultrasonido se puede llevar a cabo por varios métodos, siendo los más usados los métodos numéricos matriciales y los elementos finitos. Los modelos matriciales unidimensionales son relativamente sencillos y permiten variar rápidamente los parámetros de la simulación, esto es una ventaja importante a la hora del diseño. Por otro lado, las simulaciones basadas en los elementos finitos son más detalladas y precisas, sin embargo, generalmente son necesarios largos tiempos de simulación. En este trabajo se usó el modelo de la matriz distribuida [8].

La figura 6 muestra una representación esquemática del transductor piezoeléctrico que será implementado en este trabajo. Consiste básicamente de una cerámica piezoeléctrica de un espesor  $l_c$ , una capa frontal de espesor  $l_m$  y capa de backing de espesor



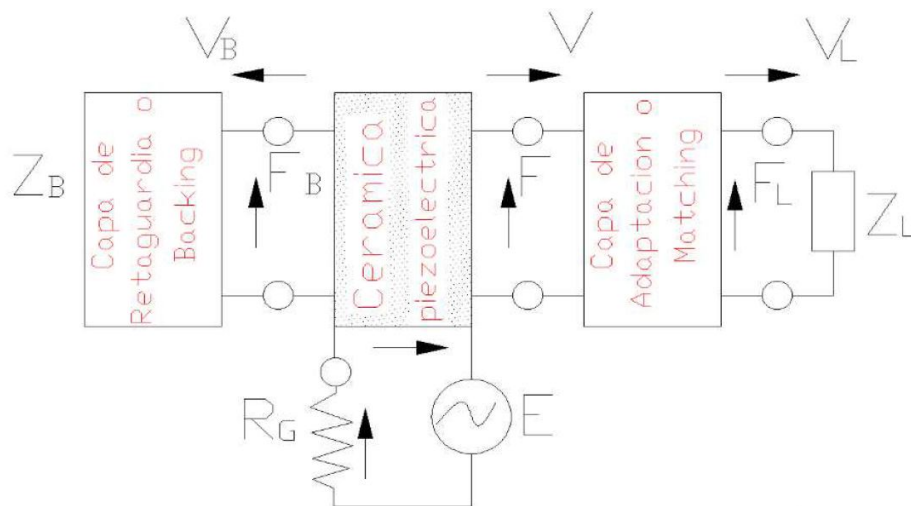
$l_b$ . La capa de backing está representada por una impedancia acústica  $Z_B$  y una carga representada por una impedancia acústica  $Z_L$ .

**Figura 6: Representación esquemática del transductor.**



Este transductor piezoeléctrico puede ser representado por medio del modelo de líneas de transmisión acústicas o electroacústicas. En el análisis a continuación se modela el transductor por medio de un sistema de tres puertos, dos acústicos y una eléctrico, como se muestra en la figura 7. Los dos puertos acústicos representan una interacción acústica del transductor con los medios semi-infinitos externos: la capa de *backing* ( $Z_B$ ) y carga ( $Z_L$ ). El puerto eléctrico representa una interacción eléctrica entre la cerámica piezoeléctrica y el circuito de excitación, compuesto por un generador de señales ( $E$ ) con una resistencia interna ( $R_E$ ). Existe otro terminal acústico intermedio que representa la interacción acústica de la cerámica piezoeléctrica y la capa de adaptación.

**Figura 7: Modelo de tres puertos de un transductor piezoeléctrico.**



El modelo de matriz distribuida [8] permite representar un elemento activo (cerámica piezoeléctrica) por medio de una matriz que relaciona la tensión eléctrica ( $V$ ) y la corriente ( $I$ ) en el terminal eléctrico con una fuerza ( $F$ ) y una velocidad de partícula ( $v$ ) en el terminal intermediario del transductor, considerando una capa de backing  $Z_B$ , dada por:

$$\begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} F \\ v \end{bmatrix} \quad (13)$$

donde  $\mathbf{A}$  es la matriz del elemento activo. Para el elemento pasivo (capa frontal o de adaptación), se puede relacionar la fuerza ( $F$ ) y una velocidad de partícula ( $v$ ) en el terminal intermediario con una fuerza ( $F_L$ ) y una velocidad de partícula ( $v_L$ ) en la carga utilizando la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} F \\ v \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} F_L \\ v_L \end{bmatrix} \quad (14)$$

donde  $\mathbf{M}$  es la matriz de capa de adaptación, así mismo sustituyendo la ecuación 13 en la ecuación 14, se encuentra la relación entre la corriente y la tensión eléctrica en el terminal eléctrico con una fuerza y una velocidad de carga:

$$\begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \mathbf{A} \mathbf{M} \begin{bmatrix} F_L \\ v_L \end{bmatrix} = \mathbf{N} \begin{bmatrix} F_L \\ v_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_L \\ v_L \end{bmatrix} \quad (15)$$

donde la matriz  $\mathbf{N}$  es el resultado del producto entre las matrices  $\mathbf{A}$  y  $\mathbf{M}$ , que son mostradas a continuación.

**3.4.1 Matriz del elemento activo.** Es obtenida a partir de la solución de las ecuaciones de onda unidimensional, considerando un elemento piezoeléctrico cuyo espesor es mucho menor que sus demás dimensiones. Si  $l_c$ ,  $A_c$  y  $c_c$ , son el espesor, el área transversal y la velocidad de propagación de onda de la cerámica respectivamente,  $Z_B$  y  $Z_C$  las impedancias acústicas del *backing* y de la cerámica, respectivamente,  $\epsilon_{33}^S$  la constante dieléctrica,  $e_{33}$  la constante piezoeléctrica y  $\omega$  la frecuencia angular, la matriz  $\mathbf{A}$  esta dada por [5]:

$$\mathbf{A} = \frac{1}{\cos(\beta) - 1 + j\zeta \sin(\beta)} \begin{bmatrix} \frac{\epsilon_{33}^S}{e_{33}C_0} & \frac{e_{33}}{j\omega\epsilon_{33}^S} \\ \frac{j\omega\epsilon_{33}^S}{e_{33}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta) + j\zeta \sin(\beta) & -Z_C[\zeta \cos(\beta) + j \sin(\beta)] \\ \frac{\sin(\beta)}{jZ_C} & 2[\cos(\beta) - 1] + j\zeta \sin(\beta) \end{bmatrix} \quad (16)$$

donde  $\beta = \frac{\omega l_c}{c_c}$ ,  $\zeta = \frac{Z_B}{Z_C}$  y  $C_0 = \frac{\epsilon_{33}^S A_c}{l_c}$ .

**3.4.2 Matriz del elemento pasivo.** Si el elemento pasivo tiene espesor  $l_m$ , velocidad de propagación de onda  $c_m$  e impedancia acústica  $Z_m$  la matriz  $\mathbf{M}$  de la capa de adaptación esta dada por [5]:

$$\mathbf{M} = \frac{1}{\cos(\beta) - 1 + j\zeta \sin(\beta)} \begin{bmatrix} \cos(\beta_m) & jZ_m \sin(\beta_m) \\ \frac{j}{Z_m} \sin(\beta_m) & \cos(\beta_m) \end{bmatrix}, \quad (17)$$

donde  $\beta_m = \frac{\omega l_m}{c_m}$ .

**3.4.3 Impedancia eléctrica del transductor.** La impedancia eléctrica de entrada del transductor ( $Z_E$ ) es obtenida partir de la ecuación 15, recordando la definición de la impedancia acústica:

$$F_L = Z_L c_L \quad (18)$$

Sustituyendo la ecuación 19 en la ecuación 15, se tiene:

$$Z_E = \frac{V}{I} = \frac{N_{12} + N_{11}Z_L}{N_{22} + N_{21}Z_L}, \quad (19)$$

donde  $N_{ij}$  son los elementos de la matriz  $N$ .

**3.4.4 Funciones de transferencia de emisión y emisión-recepción.** La transferencia de energía de la carga y de la impedancia de la capa de adaptación pueden ser estudiadas a partir de la función de transferencia de emisión (FTE), que es definida como la razón entre una fuerza ejercida por la carga ( $F_L$ ) y una tensión eléctrica aplicada por el generador ( $V_E$ ):

$$\text{FTE} = \frac{F_L}{V_E} = \frac{Z_L}{N_{11}Z_L + N_{12} + R_E(N_{21}Z_L + N_{22})}, \quad (20)$$

donde  $N_{ij}$  son los elementos de la matriz  $N$ .

La respuesta en pulso-eco del transductor puede ser estudiada usando la función de transferencia de emisión-recepción (FTER). La FTER se define como la razón entre la tensión eléctrica aplicada por el generador ( $V_E$ ) y la tensión eléctrica obtenida en la recepción ( $V_R$ ):

$$\text{FTER} = \frac{V_R}{V_E} = \left[ \frac{Z_L}{N_{11}Z_L + N_{12} + R_E(N_{21}Z_L + N_{22})} \right] \left[ \frac{2R_R}{N_{11}Z_L + N_{12} + R_R(N_{21}Z_L + N_{22})} \right], \quad (21)$$

donde  $R_R$  es la resistencia eléctrica interna del receptor.

**3.4.5 Pérdidas.** La mayor parte de las pérdidas en este tipo de transductores es ocasionada por la atenuación acústica de las ondas, además de las pérdidas dieléctricas en la cerámica. La atenuación acústica puede ser modelada usando una velocidad de propagación compleja, y las pérdidas dieléctricas mediante una constante dieléctrica compleja, por lo tanto [11]:

$$c^* = c_{(SP)} \sqrt{1 + \frac{j}{Q_m}}, \quad (22)$$

y

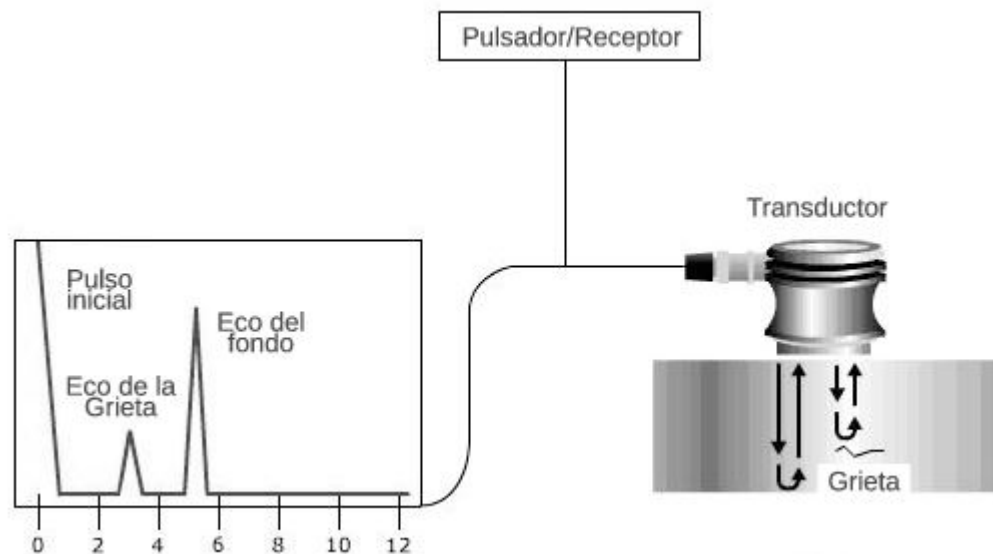
$$(\epsilon_{33}^S)^* = (\epsilon_{33}^S)_{(SP)} \left( 1 - \frac{j}{Q_d} \right), \quad (23)$$

donde  $Q_m$  y  $Q_d$  son los factores de calidad mecánico y dieléctrico respectivamente, y el subíndice  $SP$  se refiere a las propiedades de un medio sin pérdidas.

### 3.5 DETECCIÓN DE FALLAS POR ULTRASONIDO

Una inducida en una pieza mecánica se propaga a una velocidad que depende las propiedades elásticas del material. Si el material es homogéneo la onda viaja sin ningún obstáculo y solamente se refleja en las paredes de la pieza. Si el material inspeccionado presenta discontinuidades, como fisuras, inclusiones o poros, una parte de la onda es reflejada. Estas ondas reflejadas son llamadas ecos y viajan de regreso al transductor donde son recibidas y convertidas en señal eléctrica que pueden ser interpretadas en un osciloscopio. La figura 8 muestra gráficamente la técnica de detección de defectos en piezas mecánicas por ultrasonido en su forma más básica [9].

**Figura 8: Detección de defectos en piezas mecánicas por ultrasonido (imagen adaptada de NDT Education Resource Center [9]).**



## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo son simuladas la impedancia eléctrica ( $Z_E$ ) y la función de transferencia de emisión (FTE) para el transductor esquematizado en la figura 6, considerando una capa de *backing* y agua como carga. Es usada también una cerámica piezoeléctrica de material PZT-5A de diámetro 25 mm y de espesor de 2 mm, cuyas propiedades son mostradas en la tabla 3. Al frente de la cerámica es usada una capa de adaptación o *matching* de espesor 1,3 mm. Las características de los materiales usados en la capa de adaptación se muestran en la tabla 3. Para esta capa es usada una mezcla de Araldite, que es un tipo de resina epoxica, alúmina en partículas muy finas. La impedancia acústica es obtenida por el producto de la densidad, la velocidad de propagación de onda y el área transversal de las capas.

**Tabla 2. Propiedades físicas del PZT-5A**

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	7750	kg/m <sup>3</sup>
Velocidad de propagación	4350	m/s
Constante dieléctrica	1700	-
Constante piezoeléctrica	15,8	-
Factor de calidad mecánica	75	-
factor de calidad dieléctrica	50	-

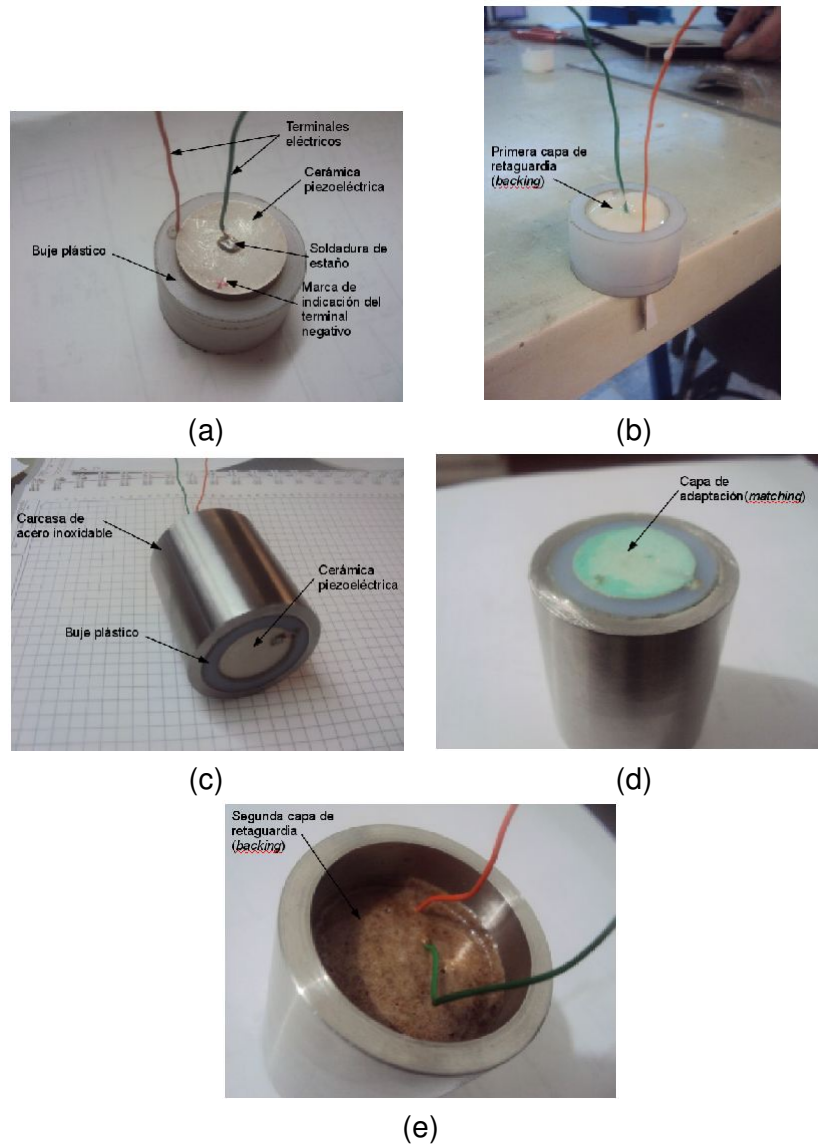
**Tabla 3. Propiedades físicas de los materiales usados en la capa de adaptación.**

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Velocidad de propagación (m/s)
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2700	6420
Araldite (Epoxy)	1160	2620

### 4.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ENCAPSULADO

Para el diseño y construcción del encapsulado se debe tener en cuenta la durabilidad y su uso en varios ambientes. El encapsulado debe preservar el material piezoeléctrico y los contactos eléctricos, además, contener las capas pasivas que sirven para adaptar la impedancias acústicas de la cerámica y la carga y amortiguar la vibración de la cerámica para aumentar el ancho de banda. Serán enumerados a continuación los pasos del proceso de encapsulado del transductor, tal como fue realizado en este trabajo.

**Figura 9: Pasos del proceso de fabricación del transductor.**



Paso 1: Se deben soldar los terminales positivo y negativo del piezoeléctrico, se recomienda usar soldadura de estaño y hacer solo un punto de soldadura que sea delicado, pues cualquier zona de la cerámica que se caliente por arriba del punto de Curie pierde la polarización y, por tanto, su piezoelectricidad. Para el PZT-5A, el punto de Curie es aproximadamente  $250^{\circ}\text{C}$ . El material piezoeléctrico viene marcado con una "x" señalando el terminal negativo. Paso 2: Se introduce la cerámica en un tubo de plástico de 35 mm de diámetro externo y 25 mm de diámetro interno con longitud de 25 mm. Se hizo una muesca al tubo de plástico en uno de sus extremos con el objetivo de pasar el cable del terminal negativo a través de dicha muesca. Se debe calcular el espesor de la capa de adaptación o *matching*. De acuerdo con la ecuación que relaciona la velocidad

de propagación y la frecuencia de excitación el espesor de la capa de adaptación será:

$$l_m = \frac{\lambda_m}{4} = \frac{c_m}{4fr} = \frac{2620 \text{ m/s}}{4(0,5 \times 10^3 \text{ Hz})} = 1,3 \text{ mm} \quad (24)$$

Este será el espacio que deberá dejarse para agregar el espesor de la capa de adaptación en la mezcla de araldite con alúmina. En la figura 9a se muestra la cerámica con la conexión de los cable eléctricos y posicionada en el tubo plástico, Se recomienda que la cerámica entre ajustada para evitar que se mueva con facilidad. Se usó una prensa hidráulica para posicionar los elementos y se recomienda ser muy cuidadosos al momento de ejercer presión sobre los elementos como la cerámica y los cables, ya que la cerámica es muy frágil y las soldaduras se despegan con facilidad. Paso 3: Para que la posición de la cerámica no se modifique al manipular los elementos, se agregó una capa inicial de *backing* de aproximadamente 10 mm usándose la misma mezcla de Araldite y alúmina que será usada en la capa de *matching* en el paso siguiente.

Paso 4: Después posicionar la cerámica según la medida indicada en el paso 2, y agregar la capa inicial de *backing*, se procede a introducir el tubo de plástico dentro del tubo de acero inoxidable mostrado en la figura 9c, posteriormente se prepara la mezcla araldite con alúmina para verter sobre el espacio que se dejó. La proporción usada fue de 1 gramo de alúmina por 5,8 gramos de araldite.

Paso 5: Se recomienda dejar la capa de adaptación un poco más alta de lo necesario, aproximadamente medio milímetro extra, para dar un acabado final usando la pulidora de muestras metalográficas. De esta manera se obtiene la capa del espesor deseado y una superficie plana y regular.

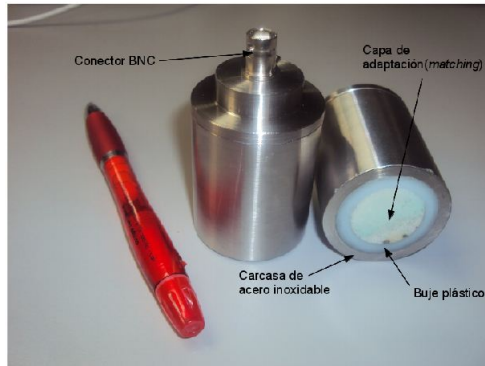
Paso 6: Para completar la capa de *backing* se deposita otra capa extra de Araldite con partículas de residuo de madera, adicionando la máxima madera posible, pero que aun permita que la resina fluya y se acomode al tubo. La madera se usa para que las ondas acústicas irradiadas por la parte trasera de la cerámica se dispersen y atenúen en el *backing* y que la menor cantidad posible reboten y regresen a la cerámica. Esto genera resonancia y perturba la señal del transductor. Por otro lado, el amortiguamiento es esencial para mejorar el ancho de banda del transductor. Se recomienda un tiempo de curado para las resinas usadas de aproximadamente 24 horas.

Paso 7: Después del curado de las resinas, los cables eléctricos están listos para ser soldados al conector BNC, que será el terminal de conexión del equipo de ultrasonido. El cable eléctrico positivo debe ser soldado al centro del conector y el otro cable puede ser soldado a la carcasa o tubo de inoxidable. Se construyó una tapa para ubicar el conector BNC. Todo el elemento debe quedar protegido y a prueba de agua, pues las pruebas serán realizadas en inmersión.

La figura 9 muestra algunas imágenes del proceso de construcción del transductor ultrasónico. El mismo proceso fue realizado para la construcción de ambos transductores.

La figura 10 muestra la apariencia final del par de transductores fabricados, ya con la tapa posterior y el conector BNC instalados.

**Figura 10: Apariencia final del par de transductores ultrasónicos de 500 kHz.**



## 4.2 MONTAJE EXPERIMENTAL

El equipo disponible para la emisión y recepción de ondas ultrasónicas es un equipo de uso portátil Krautkramer USM-25 (Agfa NDT Inc., USA). Este equipo de uso general, empleado en la industria para detectar fallas, medir espesores, escanear soldaduras, etc. Este equipo tiene la capacidad de excitar los transductores, generando una señal de alto voltaje que hace vibrar la cerámica piezoeléctrica del transductor, generando la onda acústica. También funciona como receptor, adquiriendo, amplificando y visualizando las ondas acústicas que llegan al transductor. El receptor puede ser el mismo transductor que generó la ondas, a esto se le llama trabajo en “modo pulso–eco”, o puede ser un transductor diferentes, a esto se le llama trabajo en modo “transmisión–recepción”. La figura 11 muestra los dos montajes experimentales realizados para probar el funcionamiento del transductor.

En el montaje transmisión–recepción (figura 11a), el transductor es excitado con el pulso de alto voltaje emitido por el USM-25, emitiendo una onda ultrasónica que se propaga a través del agua y llega al receptor, localizado al frente. La recepción se realiza con el segundo transductor conectado directamente al osciloscopio, sin ninguna etapa de preamplificación. Se asume que el voltaje generado a la salida del receptor es suficientemente alto para ser visto con claridad en el osciloscopio. El osciloscopio será usado para digitalizar los datos y llevarlos al computador, para ser posteriormente analizados usando Matlab.

Para el montaje pulso–eco (figura 11b) no se dispone de los equipos requeridos para digitalizar y llevar al computador las señales. Esto debido al alto voltaje de la excitación, que puede llegar a dañar la entrada del osciloscopio si se conecta directamente. por tanto, el tren de pulsos obtenido en el modo pulso–eco será visualizado directamente en la

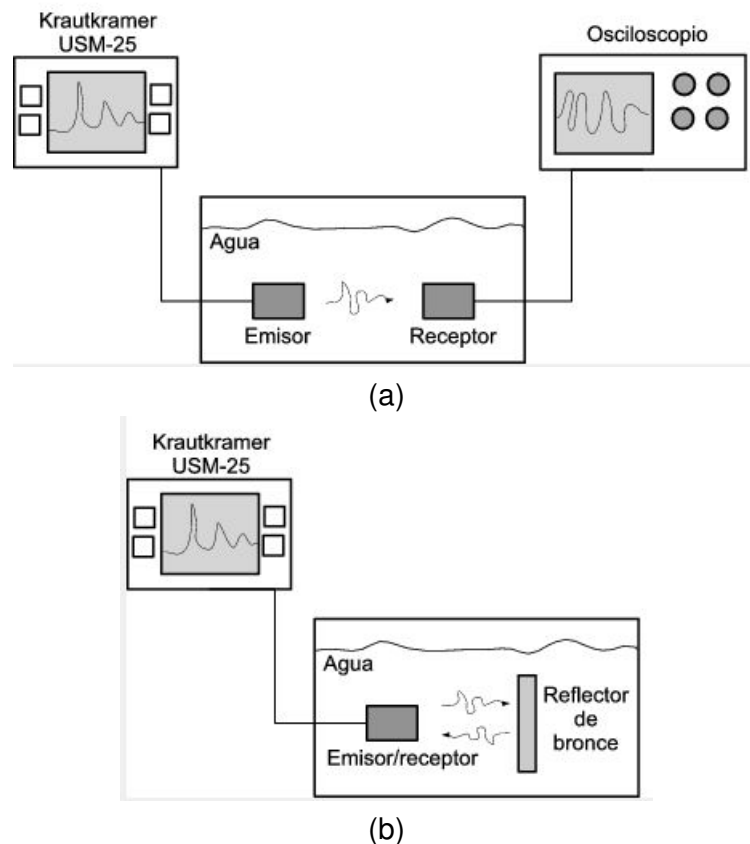


pantalla del USM-25. El ensayo se realiza usando un transductor como emisor-receptor y colocando una superficie reflectora al frente, de esta manera, las ondas acústicas que emitidas rebotan en el reflector de bronce y son recibidas por el mismo transductor. Como la superficie del transductor también es reflectora y el agua es poco atenuante, las ondas viajan una distancia relativamente grande y debe ser posible ver varios rebotes o ecos sucesivos.

El osciloscopio usado fue un UTD2102BE (Uni-Trend Group Limited, Hong Kong), con muestreo de 1 GS/s (giga muestras por segundo), 100 MHz de ancho de banda, sensibilidad vertical entre 2 mV y 5 V por división y conectividad USB. El fabricante del osciloscopio proporciona un software que permite controlar y visualizar las señales en el computador, además de adquirir los datos para su posterior procesamiento usando algún otro software como, por ejemplo, Matlab.

Los transductores de este trabajo fueron diseñados para trabajo en inmersión. Ambos ensayos se realizaron en un recipiente plástico lleno de agua obtenida directamente del grifo, con un nivel de agua suficiente para cubrir los transductores y evitar reflexiones en la superficie libre.

**Figura 11: Montaje experimental: (a) transmisión-recepción y (b) pulso-eco.**



## 5. RESULTADOS

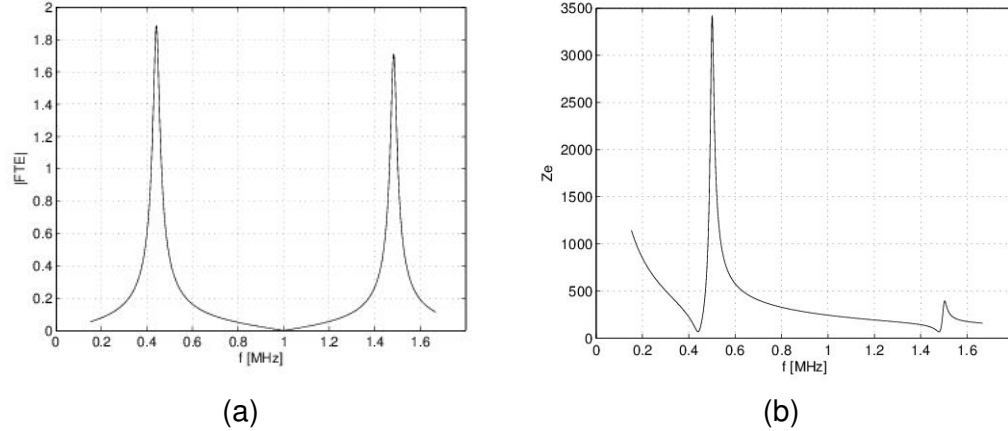
### 5.1 SIMULACIÓN DEL TRANSDUCTOR

La respuesta en frecuencia y temporal del transductor fue simulada usando el modelo de la matriz distribuida mostrado en la sección 4.4. Fue usado un programa en Matlab que implementa el modelo y que permite realizar el cálculo de las funciones de transferencia, la impedancia eléctrica y la respuesta temporal [4]. El cálculo se realizó usando las propiedades físicas reportadas en las tablas 1 y 2 para evaluando las matrices del material piezoeléctrico y las capas pasivas y calculando las funciones de transferencia en función de la frecuencia. Los cálculos fueron realizados en un rango de frecuencia entre 10 Hz y 60 MHz. La frecuencia inicial del rango no puede ser cero, pues las ecuaciones presentan un indeterminación en este punto, entonces, se escogió un valor muy pequeño. La frecuencia final de cálculo (60 MHz) es mucho mayor que la frecuencia de resonancia del transductor (0,5 MHz). Esto se debe a que existen componentes de alta frecuencia que deben ser tenidas en cuenta en el cálculo, sin embargo, los resultados son mostrado en un rango más estrecho.

La figura 12a muestra la función de transferencia de emisión (FTE) en el rango entre 150 kHz y 1,65 MHz. Se pueden apreciar dos picos donde la transferencia de energía a la carga aumenta en gran medida. El primer pico ocurre a la frecuencia de resonancia eléctrica y es un poco abajo de la frecuencia de resonancia del transductor a  $f_r = 500$  kHz, aproximadamente. El segundo pico ocurre a, aproximadamente, 1,5 MHz ( $3f_r$ ) y corresponde a la segunda resonancia. Se puede notar que no existe resonancia a  $2f_r$ , por el contrario, teóricamente, ninguna energía se transmite a esta frecuencia. Las resonancia ocurren a  $nf_r$ , donde  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Esto es característico de un material piezoeléctrico vibrando en el modo espesor.

La figura 12b muestra la curva de impedancia eléctrica del transductor. Se puede ver claramente un punto donde la impedancia eléctrica es mínima (resonancia), y existe mayor conversión de energía eléctrica en energía mecánica, coincidiendo con el resultado de la FTE, y un punto de máxima impedancia eléctrica (antiresonancia). A  $3f_r$  se presenta otra resonancia y otra antiresonancia, pero con menores cambios de magnitud.

**Figura 12: Simulación de la respuesta del transductor usando el método de la matriz distribuida: (a) función de transferencia de emisión (FTE) y (b) módulo de la impedancia eléctrica ( $Z_E$ ).**

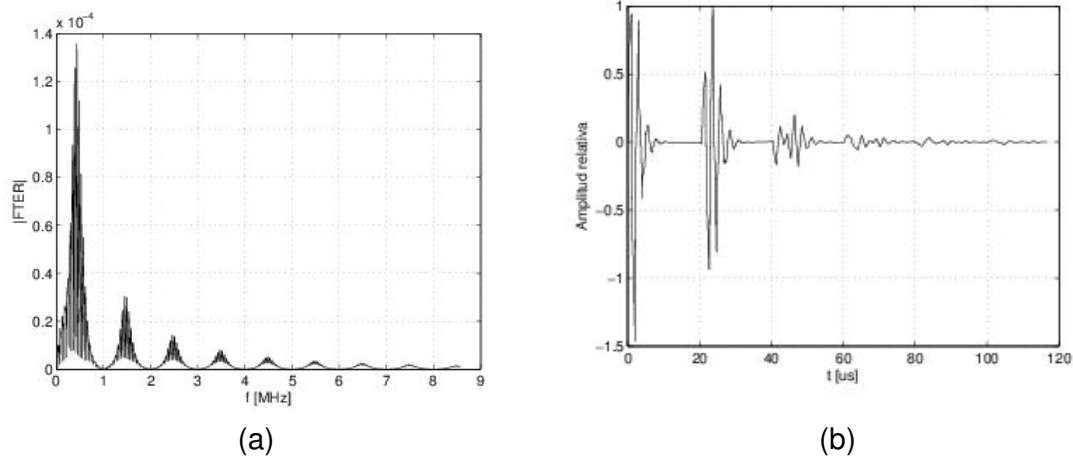


Calcular la FTER del transductor equivale a calcular la respuesta pulso-eco del transductor en el dominio de la frecuencia. Sin embargo, es necesario simular un medio de propagación al frente del transductor para visualizar la forma de onda, pues, de caso contrario, ninguna energía saldría del transductor y solamente se obtendría ruido. Por esta razón, se adicionó a la simulación una capa gruesa de aluminio al frente del transductor, esto para obtener la serie de reflexiones características de un ensayo en modo pulso eco.

La figura 13a muestra la función de transferencia de emisión-recepción (FTER) calculada, en el rango de frecuencia entre 10 Hz y 8,5 MHz. La frecuencia fue acotada por fines de visualización, pues la FTER contiene información en todo el rango calculado, hasta los 60 MHz, aunque la información más relevante se presenta en el rango mostrado en la figura. Se puede ver claramente una serie de picos de amplitud cada vez menos y con periodicidad. Realmente esta información en el dominio de la frecuencia es muy difícil de interpretar y por si sola posee poco significado, sin embargo, en el dominio del tiempo muestra claramente la respuesta y forma de onda del transductor simulado.

La figura 13b muestra la transformada inversa de Fourier de la función de transferencia de emisión-recepción ( $\mathcal{F}^{-1}\{FTER\}$ ). Esto equivale a obtener la forma de onda de las señales en el dominio del tiempo. Calcular la transformada inversa de Fourier es muy simple en Matlab, sin embargo, es un poco más difícil obtener la escala de tiempo adecuada para el gráfico. La figura muestra la serie de ecos obtenidos en la capa de aluminio incorporada al modelo, mostrando la forma de onda. El espesor de la capa de aluminio fue calculado para evitar la superposición de los ecos, que se pueden ver en la figura completamente separados.

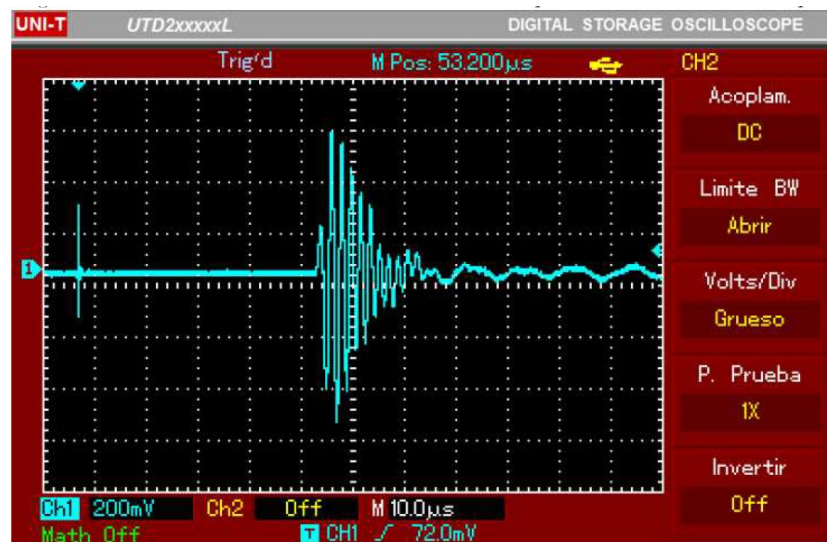
**Figura 13: Simulación de la respuesta del transductor usando el método de la matriz distribuida: (a) función de transferencia de emisión-recepción y (b) respuesta temporal.**



## 5.2 MODO TRANSMISIÓN-RECEPCIÓN

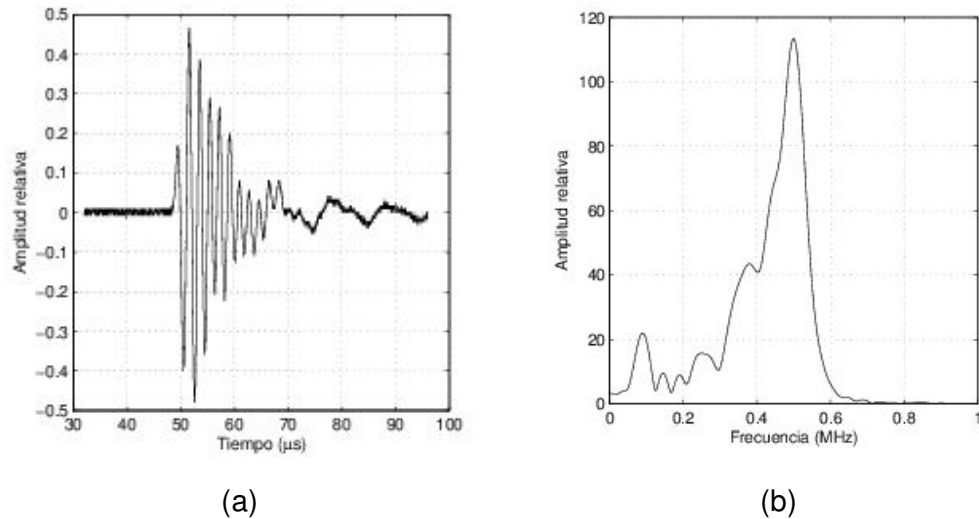
El transductor conectado al equipo de ultrasonido emite una señal que se propaga por el agua y es recibida por el otro transductor conectado al osciloscopio. La señal obtenida se muestra en la figura 14, mostrando que los transductores están respondiendo de manera aceptable a los pulsos de excitación generando señales ultrasónicas y también funcionan bien como receptor, porque la onda se puede ver con buena amplitud en el osciloscopio.

**Figura 14: Señal ultrasónica en modo emisión-recepción vista en el osciloscopio.**



El osciloscopio fue conectado al computador vía puerto USB. Las señales digitalizadas fueron guardadas en archivos con extensión SAV. Estos archivos SAV son binarios y solamente fue posible leerlos usando el programa utd2052celreader.exe, disponible libremente en la siguiente dirección electrónica: <http://www.elektronikpage.net/utd2052celreader>. El programa permite convertir los datos a formato de texto.

**Figura 15: (a) forma de onda y (b) espectro de Fourier del pulso ultrasónico obtenido experimentalmente en modo emisión-recepción.**



En la figura 15a se muestra la señal obtenida experimentalmente en el laboratorio con el osciloscopio. Aplicando la transformada de Fourier se puede obtener el gráfico de la figura 15b, en el dominio de la frecuencia y mediante la cual se puede calcular el ancho de banda. esto permite obtener la longitud del rango de frecuencias en el que se concentra la mayor parte de la potencia de la señal, también son llamadas frecuencias efectivas las que pertenecen a este rango.

El pico más alto alcanzado en amplitud relativa de la frecuencia se da en un valor cercano a 7200, el ancho de banda se puede medir en la mitad de esta curva es decir en un valor aproximado de 3600 de amplitud relativa. El ancho de banda medido en la figura 15b esta dado por la ecuación:

$$BW = \frac{\Delta f_{(-6dB)}}{f_r} = \frac{538,7 - 428,8 \text{ kHz}}{496 \text{ kHz}} = 0,222 \quad (25)$$

o en porcentaje 22,2%. Esto significa que si aumentamos o reducimos la frecuencia de trabajo del transductor en aproximadamente 11,1%, obtenemos la mitad o más de la amplitud máxima obtenida en el punto de resonancia. Un ancho de banda de 22,2% es medianamente bueno para un transductor de ensayos no destructivos, sin embargo, la

frecuencia de trabajo de 500 kHz solamente es útil para detectar fallas en piezas grandes o para caracterizar materiales en ensayos de transmisión–recepción.

El cálculo de la relación señal ruido (SNR) se realizó usando la señal adquirida. La SNR está definida de la siguiente manera [3]:

$$SNR = \left( \frac{A_{\text{señal}}}{A_{\text{ruido}}} \right)^2, \quad (26)$$

o en escala logarítmica

$$SNR_{\text{dB}} = 20 \log_{10} \left( \frac{A_{\text{señal}}}{A_{\text{ruido}}} \right), \quad (27)$$

donde  $A_{\text{señal}}$  y  $A_{\text{ruido}}$  son los valores RMS de la señal adquirida y el ruido de fondo, respectivamente. El valor RMS está dado por:

$$A_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i^2}, \quad (28)$$

donde  $a$  es la señal de interés.

El valor  $A_{\text{señal}}$  fue obtenido acotando la señal y evaluando la ecuación 28, usando los 1500 puntos que la componen. Para el cálculo de  $A_{\text{ruido}}$  se acotó un lugar del vector de datos anterior a la llegada de la señal, donde solamente se debe encontrar el ruido de fondo del sistema de adquisición, y se evaluó la ecuación 28, usando 1000 puntos. Los resultados son los siguientes:

$$SNR = 1150$$

y

$$SNR_{\text{RMS}} = 31 \text{ dB}.$$

Esto muestra que el pulso medido posee una buena relación señal–ruido, inclusive, conectando el transductor directamente al osciloscopio, sin ninguna etapa de amplificación.

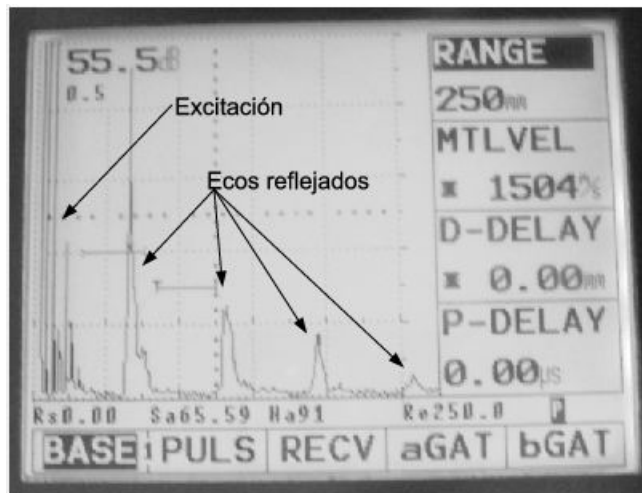
Los transductores también fueron probados intercambiando el emisor y el receptor. la señal fue adquirida en ambas configuraciones y analizada posteriormente en Matlab. Esta prueba mostró que la señal obtenida en ambos casos es muy similar, tanto en forma de onda como en amplitud.

### 5.3 MODO PULSO-ECO

También se probaron los transductores en transmisión, al ubicar una pieza metálica reflectora a cierta distancia del piezoeléctrico (ver figura 11b). Se obtuvo un tren de pulsos

característico en el equipo de ultrasonido, este tren de pulsos puede servir para caracterizar un material desconocido, a través de conocer la velocidad de propagación de la onda, encontrar el módulo de Poisson y el módulo de elasticidad y, así determinar cuál es el material que se está inspeccionando.

**Figura 16: Tren de pulsos obtenidos con el transductor de ultrasonido en el ensayo pulso-eco.**



La figura 16 muestra el tren de pulsos obtenidos en el USM-25. Se puede ver el pulso de excitación inicial (más a la izquierda) y la serie de pulsos ultrasónicos de amplitud decreciente, correspondientes a la serie de reflexiones entre el obstáculo de bronce y la cara del transductor. Se puede notar que la velocidad fijada en el aparato es de 1500 m/s, velocidad del sonido en el agua, y con un rango de medición espacial de 250 mm, se puede concluir que el reflector de bronce fue colocado a aproximadamente 65 mm de la cara del transductor. Este resultado es importante, pues muestra las bondades de los transductores fabricados y que pueden ser usados para detectar fallas en piezas grandes o para medir las propiedades elásticas de materiales de ingeniería.

## 6. CONCLUSIONES

Con la finalización de la construcción del par de transductores de ultrasonido hubo varias enseñanzas con respecto a dos de sus características más importantes, en referencia a la capa de adaptación o matching y también con relación a la capa de retaguardia o backing.

Con respecto a la capa de adaptación es importante decir que aunque se ha venido experimentando con variedad de materiales, la discusión sigue abierta hacia cual es la mejor opción de material a usar, esto es positivo ya que en futuras experimentaciones se pueden variar las composiciones de los materiales usados para tal fin, hacer mezclas y comparaciones hasta encontrar materiales más óptimos.

La capa de backing entre tanto como se pudo notar en este trabajo, tiene más libertad a la hora de la selección de los materiales a usar, por esto se usa para disipar las ondas un material como lo fue el de residuo de madera, el cual combinado con una resina epoxica en este caso araldite, resulto beneficioso a la hora de mejorar las señal recibida, haciéndola más clara en el equipo de ultrasonido usado (Krautkramer USM 25), y en el osciloscopio. Existe variedad de materiales que también pueden ser usados en próximos trabajos donde se podría mostrar la variación de diferentes tipos de materiales usados en atenuación de ondas, tanto en transductores ultrasónicos como en otras aplicaciones.

Al poder conseguir señales con el encapsulado es importante mencionar que como se había planteado en los objetivos de este proyecto, se pueden construir localmente elementos de medición que normalmente no se fabrican en nuestro país y, que normalmente son importados a un alto costo. En la actualidad muchas empresas trabajan basados en el mantenimiento predictivo, allí entra en juego el tema de la condición de los equipos y la medición previa de los mismos antes de que ocurran fallos intempestivos en máquinas los cuales generan pérdidas de producción, el ultrasonido es usado por ejemplo en inspección de espesores en tubería, ensayos no destructivos para encontrar grietas en materiales, siendo una opción dentro del campo de ingeniería mecánica interesante y que no está siendo muy estudiada hoy día en nuestro país, este trabajo busca fomentar el interés por este tema.

El costo de la elaboración de uno de los transductores fabricados es, aproximadamente, 80.000 COP (pesos colombianos). Teniendo en cuenta un valor aproximado de 15.000 por los materiales, 50.000 por la mano de obra y un costo de la cerámica la cual importándola costaría aproximadamente 15.000, si comparamos este precio con el que se ofrece actualmente para un transductor de ultrasonido de 0,5 MHz en páginas de empresas como Krautkramer, ceramic transducer desing co. y Dakota ultrasonics, la diferencia es importante pues estos transductores cuestan entre 200 y 500 dólares americanos. Por lo cual la fabricación y el desarrollo de transductores de ultrasonido localmente es económicamente viable.



## 6.1 RECOMENDACIONES

Una de las razones por la que se planteó este trabajo, fue la de dar aplicación a los equipos de los laboratorios de mecánica, equipos costosos que han sido adquiridos por la universidad desde hace algún tiempo y que no tienen un uso en específico dentro de la planeación de los cursos. En este caso específico el equipo de ultrasonido Krautkramer USM 25, puede ser usado para trabajar sobre el área de los ensayos no destructivos (END), tema que en la actualidad está siendo ampliamente usado en la industria, requerido por el medio además abordado en variedad de avances de investigaciones.

El tema del sonido es complejo de estudiar, su teoría está basada en álgebra matricial, la cual en la mayoría de los casos debe ser tratada, como se hizo en este caso a través del software matlab, también el manejo del fenómeno de la frecuencia dentro del sonido se puede prestar para numerosas investigaciones, ya que así como se manejaron en este trabajo transductores de 0,5 MHz; en posteriores investigaciones se pueden trabajar otros rangos de frecuencias para otras aplicaciones y alcances.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Auld, B. A., Ed. *Acoustic Fields and Waves in Solids*. Krieger Pub Co, New York, USA, 1990.
- [2] Cheeke, J. D. N. *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. CRC press, USA, 2002.
- [3] Chen, C. H. *Ultrasonic and advanced methods for non destructive testing and material characterization*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., New Jersey, USA, 2007.
- [4] Franco, E. E. Análise do método de medição de viscosidade de líquidos por ultrassom usando a reflexão de ondas de cisalhamento. Master's thesis, Escola Politécnica da Universidade de São paulo, 2006.
- [5] Franco, E. E., Adamowski, J. C., and Buiochi, F. Modelagem de transdutores ultrassônicos de fisioterapia pelo método da matriz distribuída. In *Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica CBEB* (São Pedro - SP, Brasil, Julio 2006).
- [6] Gallego-Juárez, J. A. Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers. *J. Phys. E: Sci. instrum.* 22 (1989), 804–816.
- [7] Kino, G. S. *Acoustic waves: devices, imaging and analog signal processing*. Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1987.
- [8] Lamberti, N., Giua, P., and Pappalardo, M. Modello matriciale e suo impiego nell'ottimizzazione della risposta impulsiva del trasduttore multielemento. Rapporto scientifico 61, Università di Salerno, 1987.
- [9] Larson, B., Ed. *Introduction to Ultrasonic Testing*. NDT Education Resource Center, 2011.
- [10] Oppenheim, A. V., Willsky, A. S., and Nawab, S. H. *Signals and Systems (2nd Edition)*. PHI Learning, New Delhi, India, 2011.
- [11] Sherit, S., and Mukherjee, B. K. The use of complex material constants to model the dynamic response of piezoelectric materials. In *Proceedings of the IEEE Ultrasonic Symposium* (1998), vol. 1, p. 633-640.
- [12] Timoshenko, S., and Goodier, J. N., Eds. *Theory of Elasticity (third edition)*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, USA, 1986.